



90
AÑOS

PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

Federación
Iberoamericana
de Ingeniería
Mecánica



8º CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Cusco, 23 al 25 de Octubre de 2007

MÉTODOS PARA ALIVIAR LAS CARGAS DE SUCCIÓN DEBIDAS A TORBELLINOS CÓNICOS EN CUBIERTAS Y TEJADOS

Sebastián Franchini*, Santiago Pindado*, José Meseguer*.

* Instituto Universitario de Microgravedad “Ignacio Da Riva” (IDR/UPM),
E.T.S.I. Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid, E-28040 Madrid, España.

*e-mail: s.franchini@upm.es

RESUMEN

En esta comunicación se analiza la eficacia de parapetos verticales porosos y parapetos en voladizo para reducir la carga aerodinámica que el viento produce en las cubiertas de edificios de baja altura. Para ello se ha estudiado la influencia de los parámetros dependientes de los parapetos (porosidad, altura, longitud de los voladizos) en las cargas aerodinámicas que aparece sobre las cubiertas. Se ha encontrado que, dependiendo de los valores de esos parámetros, los diversos tipos de parapetos, excepto los muy porosos, pueden reducir de forma muy significativa la carga de viento sobre las cubiertas.

El estudio ha sido llevado a cabo mediante ensayos en túnel aerodinámico, midiendo el coeficiente de presión en la cubierta de distintos tipos de modelos de ensayos, con el fin de determinar el modo en que los parapetos ensayados afectan a los torbellinos cónicos que aparecen en las cubiertas de las edificaciones, que son los responsables de las elevadas cargas de succión que puede darse en las cubiertas de edificios. Aunque el estudio sistemático de configuraciones de parapetos ha estado limitado al caso de cubiertas planas, también se presentan resultados medidos sobre modelos específicos de edificaciones con cubiertas no planas.

PALABRAS CLAVE: Túnel aerodinámico, cargas de viento, torbellinos cónicos, coeficiente de presión, parapetos.

INTRODUCCIÓN

Las cargas de origen aerodinámico que se producen sobre los tejados de construcciones de baja altura han sido, y son, objeto de múltiples estudios. El interés por este fenómeno reside en el hecho de que, bajo ciertas condiciones, las succiones que se generan sobre el tejado pueden ser considerables, incluso aunque la magnitud del viento incidente no sea muy grande. Suelen manifestarse fuertes picos de presión sobre superficies muy pequeñas, en las zonas cercanas a la esquina de barlovento del tejado, que son potencialmente peligrosos ya que pueden producir fallos en los recubrimientos del tejado. La causa de estas cargas de succión son los torbellinos cónicos que se generan en las aristas de los tejados cuando el viento incide de forma oblicua (Fig.1). Los bordes afilados de la cubierta fuerzan el desprendimiento de la capa límite sobre el tejado y la combinación de este flujo desprendido con la corriente libre genera los torbellinos mencionados.

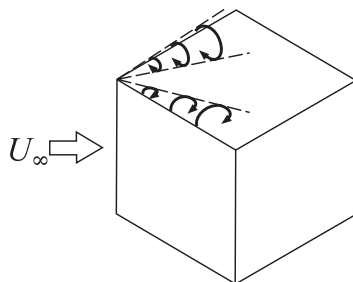


Fig. 1. Esquema de los torbellinos cónicos sobre la cubierta de una edificación.

Las cargas de succión más elevadas se producen cerca de las aristas y en la zona del tejado justo por debajo del eje de los torbellinos [1, 2]. Tomando distancias sobre el tejado a lo largo del eje del torbellino, y colocando el origen en la esquina donde nace el torbellino, se ha comprobado experimentalmente que en tejados planos el coeficiente de presión disminuye con la inversa de la raíz de la distancia al origen [3, 4].

Se han aplicado métodos empíricos [1, 2, 4, 5], semiempíricos, [6, 7, 8] y numéricos [9] en los estudios orientados a comprender los mecanismos que rigen este fenómeno. La información experimental disponible procede tanto de mediciones sobre modelos en túnel aerodinámico, como de mediciones sobre edificios a escala real 0.

El uso de parapetos verticales en el borde de las cubiertas de edificios para aliviar las cargas aerodinámicas ha sido estudiado con cierta profusión en los tres últimos decenios. En [11] se estudia el efecto de parapetos en el tejado de un modelo de edificio de altura variable; en esta publicación se concluye que, en edificios bajos, el uso de parapetos verticales sólidos de baja altura incrementa la máxima succión producida por los torbellinos cónicos. Este aumento de la carga aerodinámica también ha sido registrado por otros investigadores [12, 13, 14]. Por otro lado, en [15] se llega a la conclusión de que la máxima succión en una cubierta es independiente de la altura de los parapetos que se instalen en sus bordes hasta un cierto valor de ésta, a partir de la cual la succión máxima en el tejado desciende. Kind explica la evidente contradicción entre sus resultados y los de otros investigadores, por el hecho de que es necesario el uso de un gran número de tomas de presión en la cubierta de un modelo a escala para localizar la máxima succión en ella.

Aquí, además de parapetos sólidos, también se han estudiado los posibles beneficios del uso de parapetos porosos. El efecto de la porosidad es un factor que se tiene en cuenta en barreras cortavientos de uso en multitud de aplicaciones, desde la agricultura hasta la comodidad de peatones en áreas urbanas. La porosidad cambia las características de la estela que se forma corriente abajo de la barrera, alargando la huella de la estela y disminuyendo el nivel de turbulencia del flujo a sotavento de la barrera.

Además se ha analizado un tipo de parapeto con forma de voladizo y situado encima de los bordes de la cubierta, configuración que está siendo objeto de cierta atención en la literatura [16, 17, 18, 19]. Este dispositivo resulta ser similar al álula de borde de ataque (*slat*) en las alas de aviones. La finalidad de estos estudios ha sido analizar cómo y en qué medida la corriente de barrido que se genera entre el parapeto en voladizo y la cubierta influye en el torbellino que se forma en la cubierta de la edificación.

INSTALACIÓN EXPERIMENTAL Y ENSAYOS

Los distintos ensayos han sido realizados en el túnel aerodinámico A9 del Instituto Universitario de Microgravedad “Ignacio Da Riva” de la Universidad Politécnica de Madrid, IDR/UPM (www.idr.upm.es). Este túnel es de tipo Eiffel o de circuito abierto [20, 21], tiene 14,25 m de longitud y una cámara de ensayos de 3 m de longitud y sección

de 1,5 m de ancho por 1,8 m de alto. El aire lo mueven nueve ventiladores SODECA HTC90, cada uno con una potencia nominal de 7,5 kW y 0,9 m de diámetro.

Los ensayos se han realizado con una velocidad de la corriente de aire en la cámara de ensayos de alrededor de 22 m/s y una intensidad de turbulencia de aproximadamente 2,5%. También se han hecho algunos ensayos con mayor nivel de turbulencia, en trono al 10%, habiéndose comprobado que los resultados no dependen prácticamente del valor de este parámetro en el rango de valores ensayados.

El modelo es un prisma de base cuadrada de lado $L = 0,32$ m y altura $H = 0,16$ m. En la Fig. 2 se presenta un esquema de la situación de las 92 tomas de presión instaladas en la cubierta del mismo. Una toma de presión esta constituida por un tubo de latón de 1 mm de diámetro interior y de unos 25 mm de longitud. Uno de los extremos del tubo de latón está enrasado con la superficie exterior del modelo, en el punto donde se quiere medir la presión, mientras que el otro extremo del tubo de latón está conectado mediante tubo de plástico flexible de aplicaciones hospitalarias (para evitar estrangulaciones) al equipo de medida del túnel aerodinámico A9.

Teniendo en cuenta que el objetivo de las medidas es evaluar la presión media local y no las fluctuaciones de la misma, no se ha necesitado corregir los efectos de la resonancia de las señales a las frecuencias propias los tubos de transmisión. La longitud aproximada de los tubos de transmisión entre toma de presión e instrumento de medida es aproximadamente 0,8 m, ello quiere decir que la primera frecuencia de resonancia de estos tubos está en torno a 53 Hz, la cual es filtrada de las medidas gracias al filtro pasa-bajos incluido en la cadena de medida del túnel aerodinámico A9, cuya frecuencia de corte es de 10 Hz. Una vez filtradas, las señales analógicas se conducen hasta un sistema de adquisición de datos conectado a una tarjeta controladora que es a su vez controlada por un ordenador personal. Los ensayos se han realizado tomando 250 muestras a una frecuencia de 20 Hz en cada medida. Las presiones estática y de remanso se han medido con un tubo Pitot instalado en el techo de la cámara de ensayos del túnel A9.

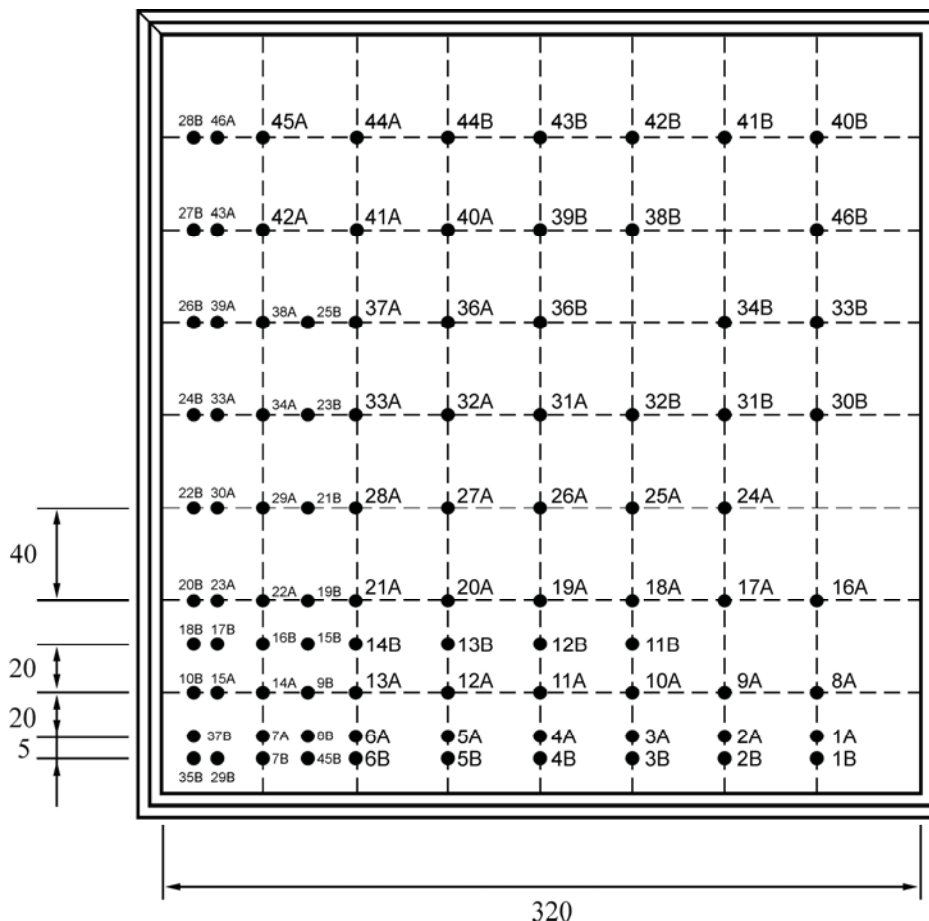


Fig. 2. Esquema acotado de la cubierta del modelo de ensayos. En el dibujo se indica la numeración adoptada de las tomas de presión. Cotas en milímetros.

INFLUENCIA DE PARAPETOS VERTICALES EN LA CARGA AERODINÁMICA

En la Fig. 3 se muestran esquemáticamente los parapetos utilizados en las medidas realizadas para evaluar la influencia de la altura y de la porosidad de parapetos verticales en la atenuación de la carga aerodinámica sobre un tejado plano. Los parapetos tipo “A” son una chapa de madera de 2,5 mm de espesor, los parapetos tipo “B” son una rejilla metálica de 10 mm de lado formada por hilos de 1 mm de espesor, los parapetos tipo “C” son una chapa de 2,5 mm de espesor con taladros de 6 mm de diámetro con sus centros dispuestos en una malla cuadrada cuyas celdillas tienen 10 mm de lado, y los parapetos tipo “D” están constituidos por una rejilla comercial de plástico de 1,1 mm de espesor. En la Tabla 1 se incluyen los datos geométricos de estos parapetos verticales, es decir, la porosidad, ϕ , y la altura adimensional, h/H , de los mismos empleada en los diversos ensayos, donde h es la altura del parapeto sobre la cubierta del modelo y H la altura del modelo de ensayos, $H = 0,16$ m.

Tabla 1. Características de los parapetos verticales utilizados en el modelo de ensayos: tipo de parapeto según la Fig. 4, porosidad, ϕ , y relación entre la altura del parapeto sobre la cubierta y la altura del modelo sin parapeto, h/H .

Tipo	Porosidad, ϕ	h/H
A	0	0,013; 0,019; 0,025; 0,031; 0,038; 0,044; 0,050; 0,063; 0,094; 0,125
B	0,81	0,019; 0,031; 0,05; 0,063; 0,069; 0,081; 0,094; 0,106; 0,125
C	0,28	0,031; 0,063; 0,094; 0,125
D	0,50	0,031; 0,063; 0,094; 0,125

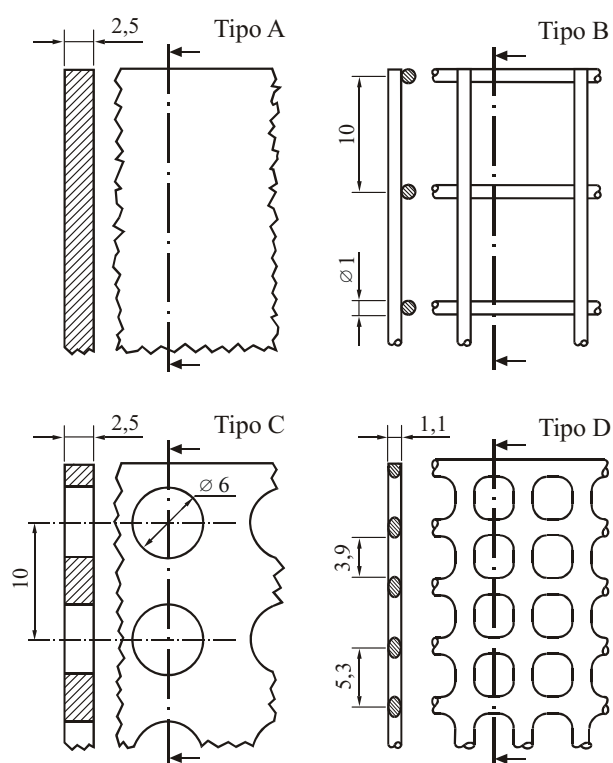


Fig. 3. Esquema de los parapetos verticales utilizados para la experimentación con el modelo de ensayos.

En la Fig. 4 se muestran las succiones máximas, $-c_p$, medidas en la cubierta del modelo de ensayos con los cuatro tipos de parapetos instalados en la cubierta, “A”, “B”, “C” y “D”, en función de la altura de los mismos, h/H . En ella se puede observar que para alturas de parapetos bajas, hasta $h/H = 0,031$, una porosidad baja y media de los parapetos reduce apreciablemente la succión máxima medida en la cubierta del modelo. Esto es, con los parapetos tipo “C” y “D” de una altura $h/H = 0,031$ la succión máxima medida se ha reducido del orden de un 30% respecto de la succión máxima medida con los parapetos tipo “A”.

En la Fig. 4 se observa además que a partir de alturas superiores a $h/H = 0,093$, los valores de la succión máxima medidos con los parapetos sólidos y con los parapetos de porosidad media ó baja son similares, $-c_p \approx 1,2-1,6$.

Se debe mencionar también que con los parapetos de porosidad intermedia (tipo “D”) de alturas grandes, las distribuciones de coeficiente de presión medidas sugieren que todavía se forma un torbellino cónico en el borde de la cubierta gracias al flujo de aire que pasa a través de los parapetos, si bien este torbellino está muy amortiguado. Esto no ocurre, obviamente, si los parapetos son sólidos, ya que los torbellinos se forman en este caso en el borde de los parapetos, es decir, más lejos de la superficie de la cubierta del modelo y por lo tanto no es de extrañar que la succión que se mide en este caso sea menor y más uniforme. Llama la atención la poca efectividad de los parapetos tipo “B” en la reducción de las cargas aerodinámicas sobre la cubierta del modelo sea cual sea la altura de los mismos. Esto es debido a la insuficiente interacción entre la estela de los hilos horizontales de la malla que conforma el parapeto y los torbellinos cónicos, pero aún así nótese que en los resultados correspondientes a estos parapetos aparecen dos valles, que corresponden a situaciones en las que uno de los hilos horizontales de la rejilla está próximo a la cubierta. Cada valle es debido a la interacción entre la calle de torbellinos de Kármán que forma el hilo con el torbellino cónico correspondiente.

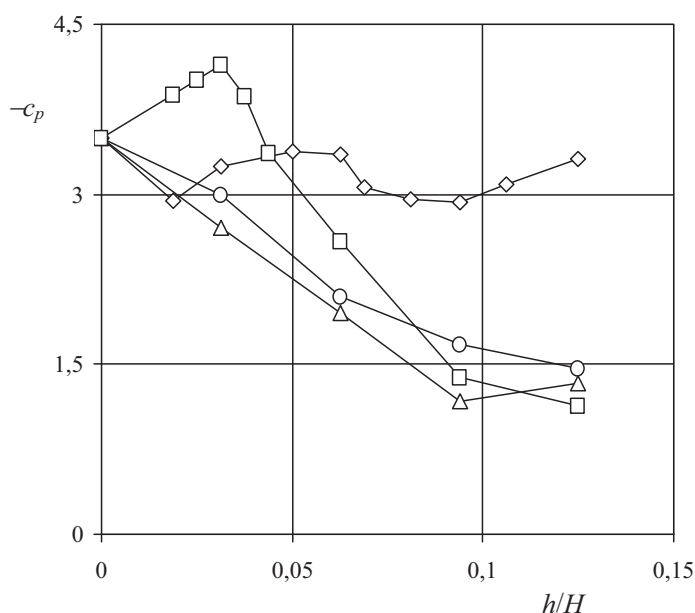


Fig. 4. Variación con la altura adimensional de los distintos parapetos, h/H , de la succión máxima medida en la cubierta del modelo de cubierta plana, $-c_p$. Los cuadrados indican parapetos tipo “A” (sólidos, $\phi = 0$), los rombos indican parapetos tipo “B” ($\phi = 0,81$), los triángulos los del tipo “C” ($\phi = 0,28$), y los círculos indican los del tipo “D” ($\phi = 0,5$). En todos los casos la corriente incide sobre el modelo según la diagonal de la forma en planta del modelo que se extiende desde la esquina con mayor densidad de tomas hasta la opuesta.

INFLUENCIA DE PARAPETOS EN VOLADIZO EN LA CARGA AERODINÁMICA

Al igual que los ensayos relativos al estudio de los parapetos verticales, los ensayos de los parapetos en voladizo se han llevado a cabo situando el modelo de ensayos con la misma orientación respecto a la corriente incidente. En la Fig. 6 se presentan de forma esquemática parapetos utilizados y sus características geométricas.

En la figura 7 se ha representado la variación de la máxima succión medida en la cubierta del modelo con la altura de los parapetos en voladizo tipo “W1” y “W2”. En esta gráfica se compara, además, el comportamiento de los parapetos en voladizo con el comportamiento de los parapetos verticales sólidos (tipo “A”) y de porosidad baja (tipo “C”). Como se puede observar, mediante el uso de los parapetos en voladizo ensayados se logra una disminución de la succión máxima más efectiva que con los parapetos verticales en el rango de alturas de parapetos bajas, es decir, en el intervalo comprendido entre $h/H = 0$ y $h/H = 0,05$. Para una altura $h/H = 0,031$, con los parapetos tipo “W1” se ha medido una disminución de la succión máxima en la cubierta del modelo de ensayos de hasta un 60% respecto de la medida con los parapetos sólidos (tipo “A”). Una vez superada la altura $h/H = 0,05$ la efectividad de los parapetos

en voladizo es menor que la mostrada por los parapetos verticales, ya sean porosos o sólidos. Esto es debido a que, como es fácil de imaginar, a una determinada altura de los voladizos la configuración local del flujo resulta poco afectado por éstos, originándose en las aristas de la cubierta y debajo de los voladizos, los torbellinos cónicos. Para una altura $h/H = 0,125$ de los parapetos del tipo “W1” y “W2”, la succión máxima medida en la cubierta del modelo de ensayos es de $-c_p \approx 3$, similar a la medida sin ningún tipo de parapeto instalado en la cubierta, $-c_p \approx 3,5$. Los parapetos tipo “S1” y “S2”, creados con el objetivo de introducir turbulencia de pequeña escala que pudiese aumentar el efecto del voladizo no demostraron en los ensayos ninguna diferencia apreciable con los tipo “W1” y “W2”.

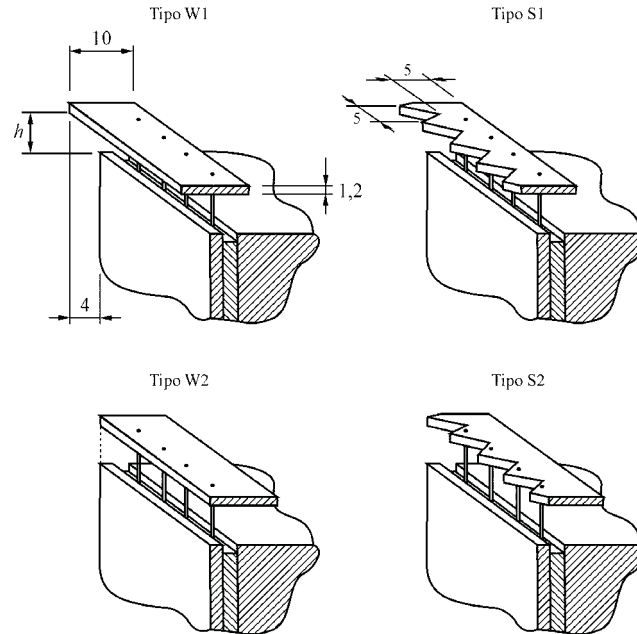


Fig. 6. Esquema acotado de los parapetos en voladizo utilizados para la experimentación con el modelo de ensayos. Cotas en milímetros.

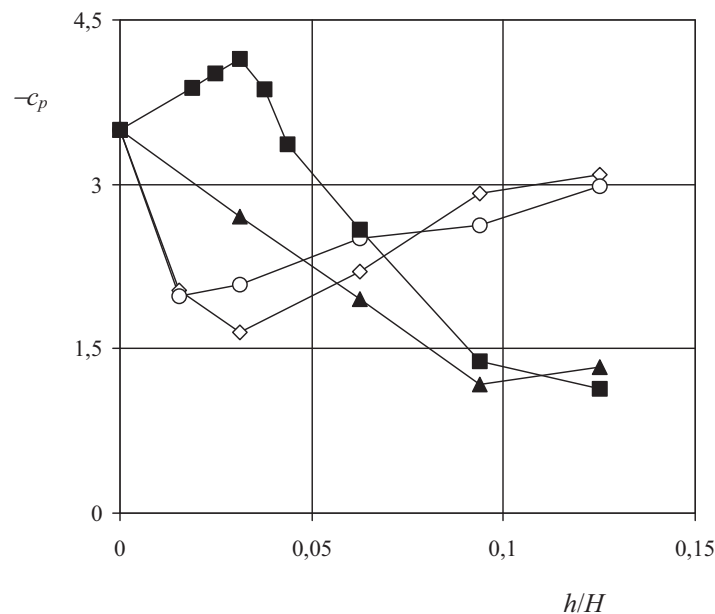


Fig. 7. Variación con la altura adimensional de los parapetos instalados en sus bordes, h/H , de la succión máxima, $-c_p$, medida en la cubierta del modelo con cubierta plana. Los rombos indican los parapetos tipo “W1”, los círculos indican los parapetos tipo “W2”, los cuadrados negros indican los parapetos tipo “A” (sólidos, $\phi = 0$) y los triángulos negros indican los parapetos tipo “C” ($\phi = 0,28$). En todos los casos la corriente incide sobre el modelo según la diagonal de la forma en planta del modelo que se extiende desde la esquina con mayor densidad de tomas hasta la opuesta.

CASOS DE ESTUDIO

En este apartado se presentan dos ejemplos de cubiertas de edificaciones aeroportuarias donde se han registrado fuertes cargas de succión. En ambos casos aparecen torbellinos cónicos sobre las cubiertas, que poseen cierta curvatura, habiéndose verificado la efectividad de los parapetos en voladizo para atenuar las cargas que éstos producen (véase también [18], donde analiza con más detalle el comportamiento de este tipo de parapetos en cubiertas curvas, considerando cubiertas de diferente curvatura).

Torre de control del aeropuerto de Tenerife-Norte, España

En la Fig. 8a se muestra el modelo de ensayos de la torre de control del aeropuerto de Tenerife-Norte, que se muestra en la Fig. 7 (a), que se divide en la torre de control y un edificio base cuya cubierta es curva. En esta cubierta curva se midieron succiones locales extremadamente altas para ciertos ángulos de incidencia del viento, coeficientes de presión del orden de -4 , lo que motivó un estudio específico para conocer la influencia de la forma curva de la cubierta en los torbellinos cónicos que generan sobre la misma, y la efectividad de un parapeto en voladizo para reducir la succión producida por tales torbellinos cónicos en la cubierta. El estudio, realizado sobre un modelo de ensayos simplificado de la cubierta curva del edificio base, véase la Fig. 8b, mostró que para parapetos en voladizo situados a alturas $h/H = 0,038$ y $h/H = 0,055$ (H en este caso es la mayor de las alturas de las esquinas del modelo), se obtiene una disminución de la succión máxima comprendida entre el 34% y el 39% respecto a la máxima succión medida en la cubierta sin parapeto, que en este caso simplificado fue $c_{p\min} = -3,24$. En este caso el voladizo ensayado tiene una anchura de 10 mm.

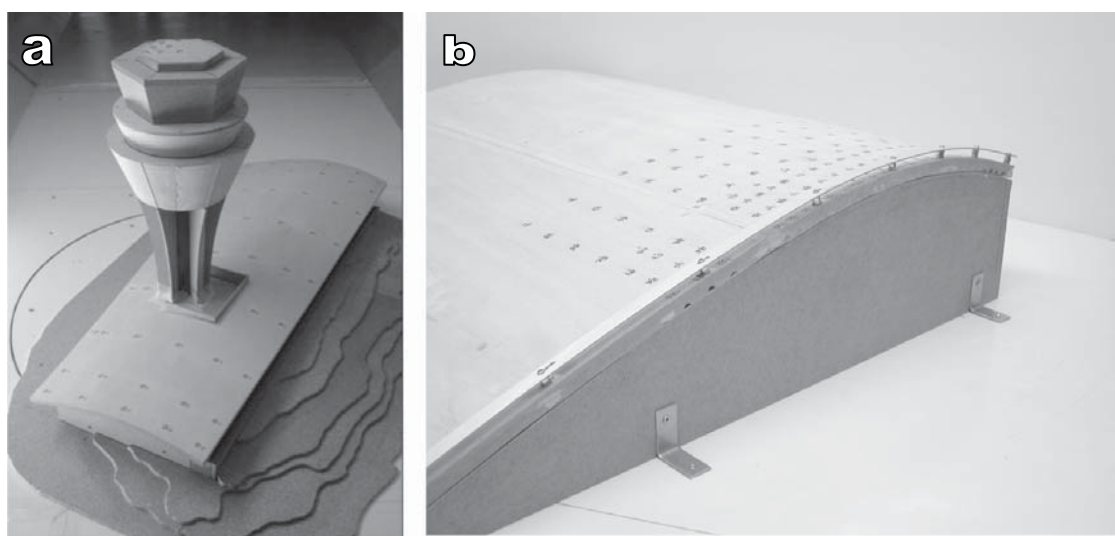


Fig. 8. (a) Modelo de ensayos utilizado para la medida de la cargas del viento en el conjunto de edificios de la torre de control del aeropuerto de Tenerife-Norte. (b) Modelo de ensayos simplificado de la cubierta con un parapeto en voladizo enrasado con verticalmente con el borde del tejado.

Aeropuerto de Santiago de Compostela, España

De forma similar al caso anterior, en los ensayos realizados para determinar las cargas aerodinámicas sobre las cubiertas de las edificaciones que conforman la nueva área terminal del aeropuerto de Santiago de Compostela, España, se detectaron cargas de succión bastante altas cerca de los aleros de la cubierta (para los ensayos se construyó un modelo a escala 1/250, véase la Fig. 9a, instrumentado con doscientas treinta y una tomas de presión). Para disminuir la magnitud de estas cargas aerodinámicas se ensayó el mismo modelo equipado con parapetos en voladizo, véase la Fig. 9b. En la Fig. 10 se presentan, para diferentes ángulos de incidencia de la corriente, los coeficientes de presión mínimos medidos en la esquina de la cubierta del modelo donde se instalaron los parapetos.

Puede observarse que la succión máxima registrada disminuye de manera apreciable con el uso de los parapetos en voladizo.

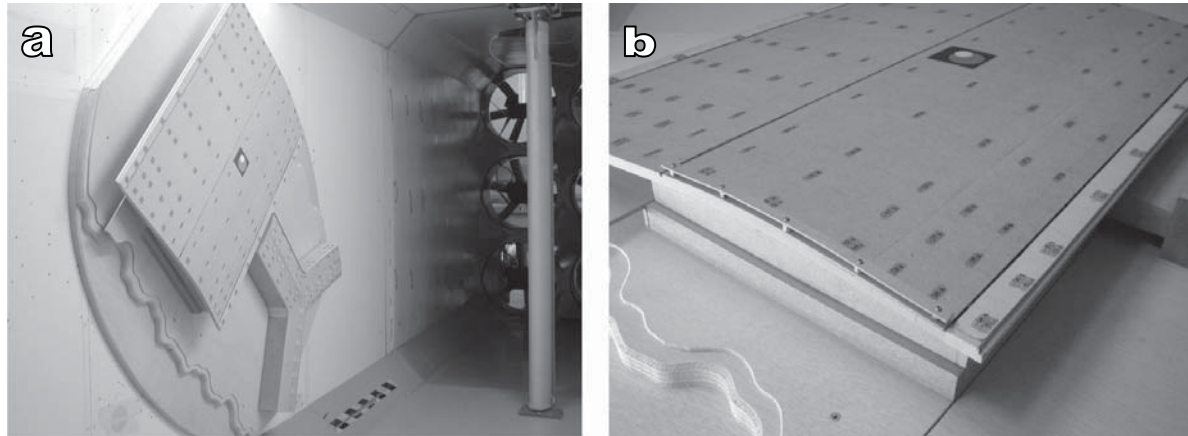


Fig. 8. (a –derecha–) Modelo de ensayos de la nueva terminal del aeropuerto de Santiago de Compostela montado en la cámara de ensayos del túnel aerodinámico A9. (b –izquierda–) Detalle de una de las esquinas de la cubierta del modelo de ensayos con un parapeto en voladizo instalado.

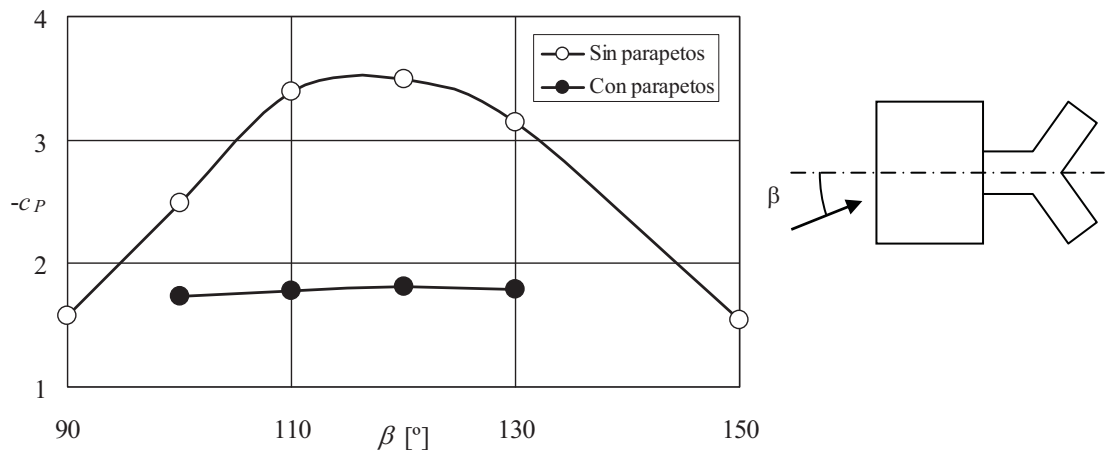


Fig. 9. Variación con el ángulo de incidencia de la corriente, β , del coeficiente de presión mínimo medido en la cubierta de la nueva área terminal del aeropuerto de Santiago de Compostela, sin y con parapetos en voladizo.

Las conclusiones de los ensayos realizados en las diferentes cubiertas es que la colocación de parapetos es un modo efectivo de disminuir la carga aerodinámica sobre las zonas aerodinámicamente mas cargadas de las cubiertas, siendo más efectivos los parapetos en voladizo que los verticales. Hay que decir, sin embargo, que aunque se hayan registrado descensos notables de la succión provocada por los torbellinos cónicos en los casos en que se ha instalado un parapeto en voladizo, a la hora de evaluar el impacto aerodinámico también se debe contabilizar la carga sobre el parapeto, así como la succión que se provoca localmente entre el parapeto y la cubierta por el hecho de encajonar el flujo de aire entre ambas.

REFERENCIAS

1. H. Kawai, Local peak pressure and conical vortex on building. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 90. (2002) 251-253.
2. S. Pindado, Uso de parapetos para la reducción de la succión producida por el viento en cubiertas de edificios. Marzo 2003. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
3. J.X. Lin, D. Surry, H.W. Tieleman, The distribution of pressure near roof corners of flat roof low buildings, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 56 (1995) 235-265.

4. C.W. Letchford, R. Marwood, On the influence of v and w component turbulence on roof pressures beneath conical vortices, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 69-71 (1997) 567-577.
5. H. Kawai, G. Nishimura, Characteristics of fluctuating suction and conical vortices on a flat roof in oblique flow. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 60. pp. 211-225. 1996.
6. D. Banks, R.N. Meroney, A model of roof-top surface pressures produced by conical vortices: Model development, *Wind and Structures* 4 (2001) 65-85.
7. N.J. Cook 1985, *The designer's Guide to Wind Loading of Building Structures. Part 1: Static Structures.* London: Butterworths.
8. N.J. Cook 1990, *The designer's Guide to Wind Loading of Building Structures. Part 2: Static Structures.* London: Butterworths.
9. S. Kawamoto, Improved turbulence models for estimation of wind loading, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 67-68 (1997) 589-599.
10. F. Wu, P.P. Sarkar, K.C. Metha. Full-scale study of conical vortices and roof corner pressures. *Wind & Structures.* 4 (2001) 131-146.
11. G. Lythe, D. Surry, Wind loading of flat roofs with and without parapets, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 13 (1983) 75-94.
12. C. Kramer, H. J. Gerhardt, S. Scherrer, Wind pressure on block-type buildings, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 4 (1979) 229-242
13. 13. A. Baskaran. T. Stathopoulos, Roof corner wind loads and parapet configurations, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 29 (1988) 79-78.
14. T. Stathopoulos, R. Marate, H. Wu, Mean wind pressures on buildings: field and wind tunnel studies *Engineering Structures.* 21 (1999) 629-638.
15. R. J. Kind, Worst suctions near edges of flat rooftops with parapets, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 31 (1988) 251-264.
16. S. Pindado, J. Meseguer, Wind tunnel study on the influence of different parapets on the roof pressure distribution of low-rise buildings, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 91 (2003) 1133-1139.
17. S. Pindado, J. Meseguer, A. Martínez, S. Franchini. Wind Tunnel analysis on the influence of cantilever parapets on the wind loads on curved roofs. *Proceedings of the Fifth International Conf. on Advances in Fluid Mechanics.* WIT Press (2004) Wessex, in press.
18. S. Franchini, S. Pindado, J. Meseguer, A. Sanz-Andrés, A parametric, experimental analysis of conical vortices on curved roofs of low-rise buildings, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 93 (2005) 639-650.
19. G. A. Kopp, D. Surry, C. Wind effects of parapets on low buildings. Parts 1-4. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 93 (2005) 817-888.
20. J. Meseguer, A. Sanz, J. M. Perales, Túneles aerodinámicos para aplicaciones de ingeniería civil, *Revista de Obras Públicas* 3.419, Año 149, Marzo 2002.
21. J. Meseguer, S. Pindado, Túneles aerodinámicos para medida de las cargas del viento, *Mundo Científico* 235 (2002) 70-75.